

УДК 621.396:681.34

Д.И. КУРУДИМОВ, В.Ф. СОЛОДОВНИК, А.В. ТОЦКИЙ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ РАДИОКАНАЛА С БИСПЕКТРАЛЬНО-ОРГАНИЗОВАННОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ**

Представлены результаты экспериментальных исследований помехоустойчивости радиоканала с использованием биспектрально-организованной модуляции в цифровой системе связи и тестовой статистики обнаружения и различения сигналов-триплет в виде пиковой оценки модуля биспектра принятого колебания. Приведены теоретические и экспериментальные результаты оценки вероятности появления ошибочного бита в широком диапазоне изменений отношения энергии бита к спектральной плотности мощности шума в радиоканале связи с аддитивным гауссовым шумом. Продемонстрированы преимущества предложенного способа биспектрально-организованной цифровой модуляции по сравнению с известными методами частотной и фазовой манипуляции.

Ключевые слова: радиоканал цифровой системы связи, помехоустойчивость, сигнал-триплет, биспектр.

Введение

Проблема повышения помехоустойчивости в системах передачи информации относится к одному из перспективных направлений совершенствования показателей современных систем телекоммуникаций, работающих в условиях воздействия интенсивных шумов и замираний в радиоканалах связи. Для обеспечения требуемой помехоустойчивости в последнее время широкое практическое распространение получили методы помехоустойчивого кодирования, включая разнообразные избыточные коды с исправлением ошибок [1], системы связи с многими входами-выходами (MIMO) [2], а также системы цифровой связи с шумоподобными широкополосными сигналами такими как, например, системы с расширением спектра: chirp spread spectrum (CSS), direct-sequence spread spectrum (DSSS), а также многочастотные системы со скачкообразным изменением рабочей частоты: frequency-hopping spread spectrum (FHSS) [3].

Наряду с перечисленными традиционными и достаточно хорошо изученными методами и системами обеспечения помехоустойчивости на кафедре приема, передачи и обработки сигналов Национального аэрокосмического университета «ХАИ» в последние годы ведутся интенсивные исследования по разработке новых способов повышения помехоустойчивости цифровых систем связи на основе биспектрально-организованной модуляции [4 – 7]. В основе предложенного нами нового способа биспектрально-организованной цифровой модуляции [7] лежат робастные методы и алгоритмы обработки цифровых сигналов с использованием свойств мо-

ментной функции третьего порядка и ее преобразования Фурье – спектра третьего порядка (биспектра) [8, 9]. В отличие от традиционно используемых при обнаружении и различении сигналов «энергетических» тестовых статистик, т.е. оценок моментных функций второго порядка, формируемых на выходе согласованного фильтра: корреляционной функции и энергетического спектра, моментная функция третьего порядка (кумулянта) и биспектр позволяют выделить в наблюдаемых данных такие связи и свойства, которые принципиально недоступны при использовании «энергетических» тестовых статистик. Кроме этого, следует отметить важное, с точки зрения помехоустойчивости, свойство стремления к нулю биспектра процесса (шума) с нормальным распределением плотности вероятности [9].

В нашей работе [6] подробно описан способ повышения помехоустойчивости цифровой системы связи на основе биспектрально-организованной модуляции и процедуры демодуляции с использованием тестовой статистики обнаружения и различения сигналов-триплет, рассчитываемой в виде пикового значения оценки амплитудного биспектра принятых сигналов. Приведены результаты теоретических расчетов вероятности появления ошибочного бита в широком диапазоне изменений отношения энергии бита к спектральной плотности мощности шума в радиоканале связи с аддитивным гауссовым шумом с замираниями и без них. На основе теоретических расчетов продемонстрировано улучшение показателей помехоустойчивости предложенного способа по сравнению с известными методами частотной манипуляции FSK и FSK-4, в которых принята общеизвестная в согласованной фильтрации тестовая статисти-

стика обнаружения и различения сигналов в виде оценки максимума корреляционного интеграла.

Важные с практической точки зрения вопросы экспериментальных исследований помехоустойчивости способа передачи информации с биспектрально-организованной модуляцией [7] ранее не рассматривались. Поэтому цель настоящей статьи заключается в экспериментальном исследовании помехоустойчивости радиоканала с биспектрально-организованной модуляцией.

1. Условия проведения экспериментальных исследований

Показатели помехоустойчивости радиоканала системы цифровой радиосвязи определяются общепринятой оценкой зависимости вероятности битовой ошибки (BER) от отношения сигнал/шум (SNR) на входе приемника [1]. В ходе эксперимента нами исследовались и сравнивались между собой показатели помехоустойчивости предложенного нового способа [7] биспектрально-организованной модуляции (БОМ) и традиционных способов фазовой (PSK) и частотной (FSK) манипуляции сигналов модулирующими потоками передаваемых данных.

Обобщенная схема проведения экспериментальных исследований и вид экспериментальной установки показаны на рис. 1 и 2 соответственно.

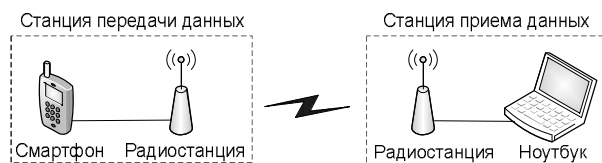


Рис. 1. Структура проведения экспериментальных исследований

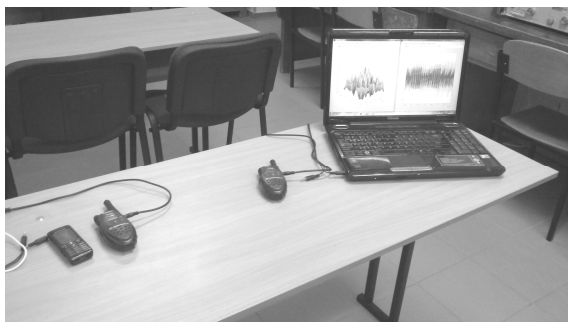


Рис. 2. Вид экспериментальной установки

Для передачи и приема тестовых сообщений через “прозрачный” (без сигнализации, шумоподавления и средств помехозащищенности) радиоканал использовались две профессиональные радиостанции T5720 фирмы Motorola с фазовой модуляцией несущих колебаний.

В качестве переносного источника хранения тестового информационного сообщения использовался смартфон, аудиовыход которого подключен к входу модулятора передающей радиостанции. Информационные данные хранились в памяти мобильного телефона в виде файла данных формата «wav» с частотой дискретизации, равной $f_d = 16$ кГц.

Ноутбук, соединенный с аудиовыходом приемной радиостанции, использовался для обработки принимаемых данных – обнаружения сигналов на фоне помех и различения сигналов-триплет.

Радиостанции были настроены на частотный канал с несущей частотой $f_c = 462,5625$ МГц. Ширина полосы рабочих частот канала связи равна $\Delta f = 12,5$ кГц, выходная мощность передатчика – 500 мВт. Такие радиостанции обеспечивают устойчивую радиосвязь при протяженности радиотрасс до 1,0 км в условиях городской застройки.

На рис. 3 показан маршрут перемещения передающей радиостанции в районе ХАИ г. Харькова с указанием точек осуществления передачи данных.



Рис. 3. Маршрут перемещения передающей радиостанции

На рис. 3 стрелками отмечены четыре дискретных удаления передающих радиостанций: 100 м, 200 м, 500 м и 700 м от фиксированного пункта приема при передаче тестового сообщения. Климатические условия проведения эксперимента: температура и влажность воздуха были равны -5°C и 98 % соответственно.

В точках передачи тестовое сообщение, сформированное в виде потока из 8192 бита данных, дважды передавалось каждым из трех видов модуляции: БОМ, FSK и PSK. На приемной стороне смесь сигнала и помехи записывалась в памяти компьютера, в котором осуществлялась биспектральная обработка сигналов.

2. Стратегия обработки сигналов

Поскольку способы манипуляции FSK и PSK хорошо изучены и подробно описаны в научно-технической литературе, ниже рассмотрим особенности работы системы радиосвязи с БОМ. На подвижном передающем пункте реализована процедура БОМ. Символам «0» и «1» в тестовом двоичном сообщении длиной 2048 бит соответствуют модулирующие сигналы-триплеты $s_0(t)$ и $s_1(t)$ [4]:

$$s_0(t) = A_0 \sum_{k=1}^3 \cos(2\pi f_{0k}t + \varphi_{0k}), \quad (1a)$$

$$s_1(t) = A_0 \sum_{k=1}^3 \cos(2\pi f_{1k}t + \varphi_{1k}), \quad (1б)$$

в которых априори задано: $f_{03} = f_{01} + f_{02}$; $\varphi_{03} = \varphi_{01} + \varphi_{02}$; $f_{13} = f_{11} + f_{12}$; $\varphi_{13} = \varphi_{11} + \varphi_{12}$.

Параметры сигналов-триплет (1a) и (1б) заданы в виде: $f_{01} = 400$ Гц, $f_{02} = 800$ Гц, $\varphi_{01} = \varphi_{02} = -\pi/4$; $f_{11} = 700$ Гц, $f_{12} = 1100$ Гц, $\varphi_{11} = 0$, $\varphi_{12} = \pi$; длительность бита $T_b = 0,01$ с. Для FSK использовались частоты $f_1 = 700$ Гц и $f_0 = 1300$ Гц для символов «1» и «0» соответственно, а для PSK были использованы фазы $\varphi_1 = 0$ и $\varphi_0 = \pi$ для символов «1» и «0» соответственно на модулирующей частоте $f_m = 700$ Гц. Все три вида модулирующих колебаний, реализующих БОМ, FSK и PSK, были записаны в виде аудио-файлов формата wav, длительностью 20 с. При заданной частоте дискретизации, равной $f_d = 16$ кГц, каждый отдельный бит передаваемого тестового сообщения содержит 160 цифровых отсчетов.

Предлагаемая стратегия различения двух известных сигналов-триплет (1a) и (1б), принимаемых на фоне шума, основана на отличии оценки модуля биспектра (биамплитуды) принятого колебания от биамплитуды сигнала-триплет [6]. Структура биспектрального демодулятора показана на рис. 4.

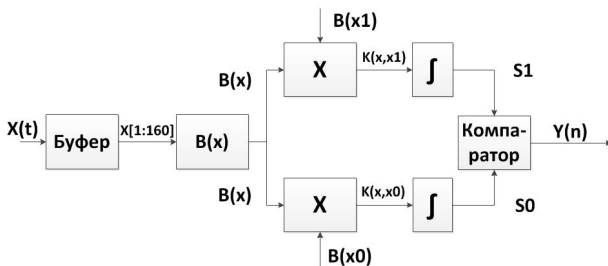


Рис. 4. Структура биспектрального демодулятора сигналов-триплет

В буфере (см. рис. 4) аккумулируются текущий массив отсчетов $x(t)$, равный аддитивной смеси полезного сигнала-триплет $s_i(t)$ и гауссова шума $n(t)$, $t = 1, 2, \dots, 160$ отсчетов; $i = 0, 1$. Для этого принятого колебания $x(t)$ в блоке $V(x)$ вычисляют оценку би-

амплитуды по алгоритму, подробно описанному в [4]. Для уменьшения времени обработки обрабатывались не все 160, а только центральные 128 отсчетов. Для этого количества отсчетов хорошо подходит алгоритм БПФ, а оставшиеся 16 отсчетов в начале и конце данного отрезка сигнала-триплет служат в качестве защитных интервалов, снижая тем самым вероятность одновременного оценивания сигналов, принадлежащих соседним битам, т.е. уменьшая межсимвольную помеху. Принятие решения выполняют в компараторе на основе следующего сравнения оценок биспектральных тестовых статистик – пиковых значений биамплитуды [6]:

$$[|\langle \hat{B}_x(f_1, f_2) \rangle_M|_{\max} - |\dot{B}_0(f_1, f_2)|_{\max}]^2 \begin{matrix} < \\ > \end{matrix} \begin{matrix} s^*=s_0^* \\ s^*=s_1^* \end{matrix}, \quad (2)$$

где $|\langle \hat{B}_x(f_1, f_2) \rangle_M|_{\max}$ – максимум осредненной оценки биамплитуды принятого колебания $x(t)$; $\langle \dots \rangle_M$ означает осреднение по ансамблю из M сегментов, на которые разбивают длительность бита T_b для получения сглаженной оценки биамплитуды; $\langle \hat{B}_x(f_1, f_2) \rangle_M = \langle \dot{X}_i(f_1) \dot{S}_i(f_2) \dot{S}_i^*(f_1 + f_2) \rangle_M$, $i = 0, 1$; $\dot{X}_i(f)$ – преобразование Фурье входного колебания $x(t)$; $\dot{S}_i(f)$ – преобразование Фурье сигнала триплет (1a) или (1б); $|\dot{B}_0(f_1, f_2)|_{\max}$ – максимум биамплитуды сигнала-триплет $s_0(t)$; $\dot{B}_0(f_1, f_2) = \dot{S}_0(f_1) \dot{S}_0(f_2) \dot{S}_0^*(f_1 + f_2)$; $|\dot{B}_1(f_1, f_2)|_{\max}$ – максимум биамплитуды сигнала-триплет $s_1(t)$; $\dot{B}_1(f_1, f_2) = \dot{S}_1(f_1) \dot{S}_1(f_2) \dot{S}_1^*(f_1 + f_2)$.

Отличительная особенность правила максимального правдоподобия (2) заключается в том, что данное правило записано для спектральных оценок моментных функций третьего порядка – биспектральных оценок. Биспектральное правило принятия решения означает, что решение в пользу сигнала-триплет $s_0(t)$ принимают в случае, когда оценка биамплитуды принятого колебания $|\hat{B}_x(f_1, f_2)|$ в среднем меньше отличается от биамплитуды данного сигнала $|\dot{B}_0(f_1, f_2)|$, т.е. функция $|\hat{B}_x(f_1, f_2)|$ больше похожа на функцию $|\dot{B}_0(f_1, f_2)|$. Решение в пользу сигнала-триплет $s_1(t)$ принимают в случае, когда оценка биамплитуды принятого колебания $|\hat{B}_x(f_1, f_2)|$ в среднем меньше отличается от биамплитуды данного сигнала $|\dot{B}_1(f_1, f_2)|$.

3. Анализ результатов эксперимента

Для оценивания и сравнения между собой показателей помехоустойчивости, полученных в результате расчетов и эксперимента, были построены теоретические [6] (рис. 5) и экспериментальные (рис. 6) зависимости вероятности битовой ошибки BER от входного отношения сигнал-шум E_b/N_0 .

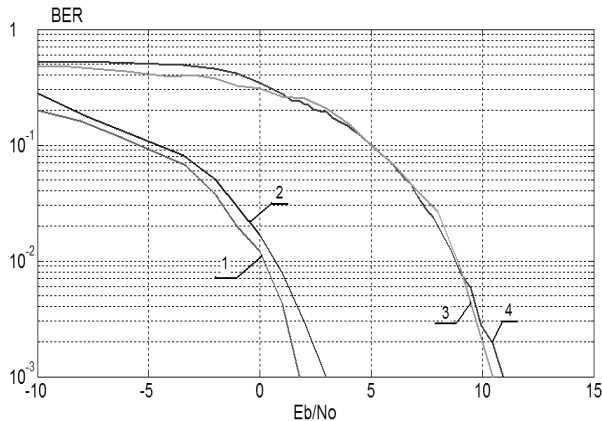


Рис. 5. Кривая 1 – БОМ (использовано сглаживающее окно Рао-Габра); кривая 2 – БОМ без использования оконного сглаживания; кривая 3 – FSK-4; кривая 4 – FSK

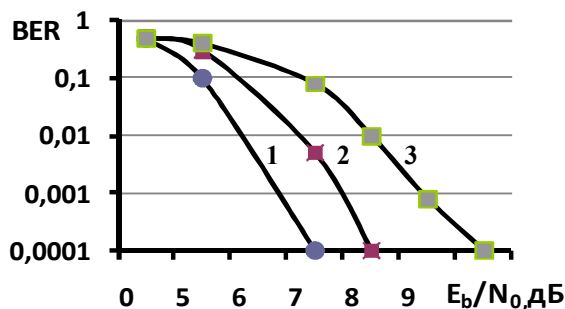


Рис. 6. Экспериментальные зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум для БОМ (кривая 1), PSK (кривая 2) и FSK (кривая 3)

В теоретических расчетах для получения статистически сглаженной оценки биамплитуды каждый сигнал-триплет был разбит на $M = 8$ сегментов с 50% перекрытием. Затем при расчете оценки биспектра проводилось осреднение по выборке из $M = 8$ сегментов. Для уменьшения растекания биспектра, то есть с целью уменьшения межсимвольной помехи, при расчетах биспектра вводилось сглаживающее окно Рао-Габра [6]. Для корректного сравнения помехоустойчивости БОМ и известных видов частотной манипуляции FSK и многопозиционной манипуляции FSK-4 частоты при теоретических расчетах были выбраны исходя из равенства спектральной эффективности двух сравниваемых видов частотной манипуляции.

Сравнение помехоустойчивости БОМ и известных видов цифровой модуляции с помощью графиков на рис. 5 и 6 позволяет отметить следующее:

- и результаты теоретических расчетов (см. рис. 5), и результаты эксперимента (см. рис. 6) свидетельствуют о выигрыше в помехоустойчивости, который обеспечивает БОМ по сравнению с традиционными методами FSK и PSK;

- как видно из графиков теоретических расчетов (см. рис. 5) при величине $BER = 10^{-3}$ БОМ обеспечивает выигрыш, величина которого приблизительно равна 8 дБ по сравнению с FSK-4 и FSK;

- анализ результатов эксперимента (см. рис. 6) показывает, что при $BER = 10^{-4}$ БОМ обеспечивает выигрыш по SNR, равный 1 дБ и 3 дБ по сравнению с FSK и PSK соответственно или с другой стороны при $SNR = 7$ дБ БОМ обеспечивает выигрыш по BER по сравнению с PSK примерно на полтора, а по сравнению с FSK – примерно на три порядка.

Заключение

Выполнены экспериментальные исследования помехоустойчивости радиоканала системы цифровой радиосвязи с использованием нового метода биспектрально-организованной модуляции, тестовой статистики обнаружения и различения принятых сигналов в виде оценок их модулей биспектра и правила принятия решения по максимуму правдоподобия. Представлено описание эксперимента, проведенного с помощью профессиональных радиостанций в условиях городской застройки. Результаты экспериментально полученных показателей помехоустойчивости и их сравнение с теоретическими расчетами показывают преимущества предложенного метода по сравнению с известными методами частотной и фазовой манипуляции.

Литература

1. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение [Текст]: пер. с англ. / Б. Скляр. – 2-е издание. – М. Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
2. Alamouti, S.M. A simple transmit diversity technique for wireless communications [Text] / S.M. Alamouti // IEEE Journal on Select Areas in Communications. – 1998. – Vol. 16, No. 8. – P. 1451-1458.
3. Варакин, Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами [Текст] / Л.Е. Варакин. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
4. Тоцкий, А.В. Способ повышения помехоустойчивости цифровой системы связи на основе биспектрально-организованной модуляции [Текст] /

А.В. Тоцький, В.В. Науменко // *Радиоэлектронные и компьютерные системы.* - 2010. - №2 (43). - С. 27-32.

5. Тоцький, А.В. *Определение оптимальной длительности бита в системе связи с использованием биспектрально-организованной модуляции [Текст] / А.В. Тоцький, В.В. Науменко // Радиоэлектронные и компьютерные системы.* - 2011. - №2 (50). - С. 22-26.

6. Науменко, В.В. *Оптимальный прием биспектрально-организованных двоичных сигналов-триплет в канале с замираниями [Текст] / В.В. Науменко, А.В. Тоцький // Радиоэлектронные и компьютерные системы.* - 2011. - № 4 (52). - С. 29-34.

7. Пат. 98232 Україна, МПК Н04В 7/00, Н04В 14/00. *Спосіб передачі даних / Зеленський О.О., То-*

цький О.В., Солодовник В.Ф., Науменко В.В.; Заявник і патентовласник Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «Харківський авіаційний університет». - № а201015327; заявл. 20.12.2010; опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8. - 4 с.: іл.

8. Nikias, C.L. *Bispectral estimation: A digital signal processing framework [Text] / C.L. Nikias, M.R. Raghuveer// Proc. IEEE.* - 1987.- Vol. 75, No. 7. - P. 869-891.

9. Зеленский, А.А. *Биспектральный анализ в приложении к цифровой обработке сигналов [Текст] / А.А. Зеленский, В.В. Лукин, А.В. Тоцький // Цифровая обработка сигналов и изображений в радиофизических приложениях; под ред. В.Ф. Кравченко.* - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. - С. 92-173.

Поступила в редакцію 04.03.2013, рассмотрена на редколлегии 13.03.2013

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник, зав. отделом №35 В.Г. Сугак, Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ РАДІОКАНАЛУ З БІСПЕКТРАЛЬНО-ОРГАНІЗОВАНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ

Д.І. Курудимов, В.Ф. Солодовник, О.В. Тоцький

Наведено результати експериментальних досліджень завадостійкості радіоканалу з використанням біспектрально-організованої модуляції у цифровій системі зв'язку та тестової статистики виявлення та розрізнення сигналів-триплет, яку розраховують у вигляді пікової величини оцінки амплітудного біспектру прийнятого коливання. Представлено теоретичні та експериментальні результати розрахунків ймовірності з'явлення помилкового біту у широкому діапазоні змін відношення енергії біту до спектральної щільності шуму у радіоканалі з адитивним гаусовим шумом. Продемонстровано переваги запропонованого способу біспектрально-організованої модуляції в порівнянні з відомими методами частотної та фазової маніпуляції.

Ключові слова: радіоканал цифрової системи зв'язку, завадостійкість, сигнал-триплет, біспектр.

EXPERIMENTAL STUDY OF NOISE RESISTANCE IN RADIO CHANNEL USING BISPECTRAL-ORGANIZED MODULATION

D.I. Kurudymov, V.F. Solodovnik, A.V. Totzky

Results of experimental investigations dedicated to study of noise resistance observed in radio channel of digital communication system by using bispectral-organized modulation and signal detection and discrimination test statistic computed in the form of magnitude bispectrum estimate of received signal are represented and discussed. Results of theoretical and experimental computations of bit error rate are obtained for wide range of bit energy -to-noise power spectral density ratios in communication radio channel. The benefits of suggested bispectral-organized modulation technique are demonstrated comparing to known frequency and phase shift keying.

Key words: radio channel of digital communication system, noise resistance, signal-triplet, bispectrum.

Курудимов Дмитрій Іванович – магістр кафедри приёма, передачі и обработки сигналов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Солодовник Виктор Федорович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри приёма, передачі и обработки сигналов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Тоцький Александр Владимирович – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедри приёма, передачі и обработки сигналов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.